

ENROLLADO CALIENTE DE ACEROS QUE CONTIENEN AUSTENITA

METAESTABLE

PRIORIDAD

5 [0001] Esta solicitud reivindica prioridad de la Solicitud Provisional de EE.UU. con
No. de Serie 62/278,567, titulada ENROLLADO CALIENTE DE ACEROS QUE
CONTIENEN AUSTENITA METAESTABLE, presentada el 4 de enero de 2016, y la
Solicitud Provisional de EE.UU. con No. de Serie 62/407,001, titulada ENROLLADO
CALIENTE DE ACEROS QUE CONTIENEN AUSTENITA METAESTABLE,
10 presentada el 12 de octubre de 2016, cuyas divulgaciones se incorporan acá por
referencia.

ANTECEDENTES

[0002] El enrollado en frío de aceros que contienen austenita metaestable puede
15 ser desafiante debido a la transformación inducida por deformación de la austenita
metaestable en una fase de martensita de alta resistencia. El enrollado en frío de
dicho acero lleva a un aumento significativo en cargas de molino. El acero también
necesita someterse a recocido para austenización parcial o completa antes de que
se pueda realizar una reducción en frío adicional.

20

RESUMEN

[0003] La presente invención involucra el calentamiento del material antes o durante
el enrollado en frío para suprimir la transformación de austenita en martensita. Esto
puede resultar en cargas de molino menores y mayores cantidades de reducción en
25 cargas similares. La capacidad de reducir más material puede también llevar a
menos recocidos intermedios antes que el material pueda llegar a un calibre final.
Sorprendentemente, el acero enrollado caliente ha mostrado propiedades
mecánicas mejoradas cuando se compara con acero reducido a la misma cantidad

por enrollado en frío. El enrollado en frío seguido por un recocido posterior también resulta en mejores propiedades mecánicas que las logradas en enrollado del material en frío de la misma cantidad y luego recocido. El acero que ha sido enrollado en caliente, con enrollado posterior a temperatura ambiente (enrollado en frío), muestra mejora tanto en resistencia como en ductilidad.

[0004] Previamente, el enrollado en caliente había sido evitado en el ambiente de la producción debido a la preocupación que éste puede causar daño al equipo de enrollado, así como presentar riesgos relacionados con el calentamiento de los aceites usados como lubricantes. La presente solicitud muestra que los beneficios del enrollado en caliente se pueden lograr a temperaturas moderadas y sin modificaciones lineales extensivas.

DESCRIPCION DE LAS FIGURAS

[0005] La Figura 1 ilustra el porcentaje de martensita en un acero metaestable como una función de la reducción en porcentaje que resulta del enrollado en caliente y el enrollado en frío.

[0006] La Figura 2 ilustra el porcentaje de alargamiento en un acero metaestable como una función de la reducción en porcentaje del enrollado en frío y el enrollado en caliente.

[0007] La Figura 3(a) ilustra las curvas de estrés verdadero-tensión verdadera para un acero metaestable que fue enrollado en caliente y luego enrollado en frío.

[0008] La Figura 3(b) ilustra las curvas de estrés verdadero-tensión verdadera para un acero metaestable que fue enrollado en frío en dos pasadas.

DESCRIPCION DETALLADA

[0009] Esta invención pertenece a aceros que contienen una cantidad significativa de austenita metaestable (10%-100% de austenita), referidos como “acero metaestable”. La austenita se considera metaestable si se transforma en martensita

con deformación mecánica. Dicha martensita es denominada martensita inducida por deformación. Los aceros que contienen dicha austenita metaestable pueden ser acero de carbono o acero inoxidable.

[0010] Existen varias formas de caracterizar la estabilidad de la austenita. Una forma es calcular un Factor de Inestabilidad (FI) de la austenita con base en su composición química. Este factor se describió en la Patente US 3,599,320 (cuya divulgación se incorpora acá por referencia), la cual define FI como:

$$\text{FI} = 37.193 - 51.248(\%C) - 0.4677(\%Cr) - 1.0174(\%Mn) - 34.396(\%N) - 2.5884(\%Ni).$$

Ecuación 1

[0012] Los aceros con valores de FI calculados de 0-2.9 se categorizan como “ligeramente metaestables” y los aceros con FI mayor a 2.9 se categorizan como “moderadamente metaestables”. El método de la presente invención tiene la mayor significancia para aceros que contienen austenita metaestable con un FI mayor a 2.9.

[0013] Otra técnica para caracterizar la estabilidad de la austenita es calcular o medir lo que se conoce como temperatura M_d30 . Para una composición de acero metaestable dada, en deformación a 0.3 tensión verdadera a la temperatura M_d30 , 50% de la austenita se transforma en martensita. Para una composición de acero metaestable dada, la temperatura M_d es la temperatura por encima de la cual no se forma martensita con deformación. Las temperaturas M_d y M_d30 son bien conocidas en el estado del arte. Adicional a ser determinada empíricamente, la temperatura M_d30 para una composición de acero particular también se puede calcular mediante una de varias ecuaciones que se pueden encontrar en la literatura, incluyendo las siguientes:

[0014] Como se enseña por Nohara, K., Ono, Y. y Ohashi, N. 1977. Composición y Dependencias de Tamaño de Grano de Transformación Martensítica Inducida por Tensión en Aceros Inoxidables Austeníticos Metaestables. Diario del Instituto del

Hierro y el Acero de Japón, 63(5), pp. 212-222 (cuya divulgación se incorpora acá por referencia):

$$M_{d30} = 551 - 462(\%C + \%N) - 68\%Cb - 13.7\%Cr - 29(\%Cu + \%Ni) - 8.1\%Mn - 18.5\%Mo - 9.2\%Si$$

Ecuación 2

- 5 [0015] Como se enseña por Angel, T. 1954. Formación de Martensita en Aceros Inoxidables Austeníticos. Diario del Instituto de Hierro y Acero, 177 (5), pp. 165-174 (cuya divulgación se incorpora acá por referencia):

$$M_{d30} = 413 - 492(\%C + \%N) - 13.7\%Cr - 8.1\%Mn - 18.5\%Mo - 9.5\%Ni - 9.2\%Si$$

Ecuación 3

- 10 [0016] Entre mayor sea la temperatura M_{d30} de la austenita de una composición de acero metaestable dada, más inestable será la austenita. La temperatura M_{d30} en dicha austenita metaestable está por encima de la temperatura M_d (temperatura de inicio de martensita de martensita térmica).

- [0017] Los aceros con una cantidad significativa de trabajo de austenita metaestable
15 se endurece más rápidamente a medida que la austenita se transforma en martensita de mayor resistencia. Este endurecimiento de trabajo, y la martensita resultante, puede presentar un reto cuando se enrolla en frío adicional dichos aceros debido a que ellos requieren mayores cargas que pueden superar la capacidad del molino. Dichos aceros metaestables luego necesitan ser recocidos para formar algo
20 o toda la austenita antes que se pueden enrollar en frío más. Si durante el enrollado, se puede suprimir la transformación de austenita en martensita, el acero se puede enrollar en calibres más delgados, con menores cargas de molino. Una forma de suprimir dicha transformación es calentando el material antes o durante el enrollado en frío. El enrollado en caliente ha mostrado tener beneficios adicionales que
25 resultan en mejores propiedades mecánicas.

[0018] Los métodos de la presente solicitud involucran enrollar dichos aceros metaestables mientras el acero está caliente. Se considera caliente cuando la temperatura del acero metaestable está por encima de la temperatura ambiente

(típicamente aproximadamente 80°F). Para ciertas modalidades, el acero se calienta a una temperatura cercana o por encima de la temperatura M_d para la composición de acero metaestable particular. En otras modalidades, el acero se calienta a una temperatura por encima de la temperatura M_{d30} para la composición de acero metaestable particular. En otras modalidades, el acero metaestable se calienta a una temperatura menor o igual a 250°F.

[0019] Las bobinas de dicho material se pueden calentar en formas que serán evidentes para los expertos en la materia, incluyendo uno o una combinación de los siguientes métodos:

- 10 [0020] I. Calentar la bobina en un horno antes de ponerla en la línea de enrollado.
- [0021] II. Calentar la bobina en la línea mediante el uso de calentadores, antes que sea enrollada en frío.
- [0022] III. Calentar el refrigerante sobre el molino antes de enrollar el material de acero. Esto se puede realizar de varias formas. Una forma es apagar la torre de enfriamiento en el molino de enrollado y correr algún otro material para calentar el refrigerante antes de enrollar el acero metaestable. Otros métodos de calentar el refrigerante antes del enrollado serán evidentes para los expertos en la materia.
- 15 [0023] El acero metaestable es fundido, moldeado, enrollado en caliente, y recocido antes del enrollado en frío (si es aplicable) de acuerdo con el procesamiento típico para hacer metal para la composición particular. Durante el procesamiento de enrollado en frío del acero metaestable, por lo menos una pasada de “enrollado en frío” es una pasada de “enrollado en caliente” que se realiza mientras el acero está caliente, es decir, mientras el acero está a una temperatura por encima de 80°F. En algunas modalidades, el acero se calienta a una temperatura no mayor a 250°F. En
- 20 para hacer metal para la composición particular. Durante el procesamiento de enrollado en frío del acero metaestable, por lo menos una pasada de “enrollado en frío” es una pasada de “enrollado en caliente” que se realiza mientras el acero está caliente, es decir, mientras el acero está a una temperatura por encima de 80°F. En algunas modalidades, el acero se calienta a una temperatura no mayor a 250°F. En
- 25 otras modalidades, el acero metaestable se calienta a una temperatura cerca o mayor a la temperatura M_d para la composición de acero metaestable particular. Y en otras modalidades, el acero metaestable se calienta a una temperatura cercana o mayor a la temperatura M_{d30} para la composición de acero metaestable particular.

Dichas pasadas de enrollado en caliente pueden ser una o más de la primera, segunda o cualquier paso de “enrollado en frío” posterior.

[0024] En algunas modalidades de la presente invención, el acero metaestable puede ser recocido después de uno o más pasos de enrollado en caliente. Por ejemplo, durante el procesamiento de “enrollado en frío”, el acero metaestable puede ser enrollado en caliente en una primera pasada, recocido, y luego enrollado en frío (a temperatura ambiente) en una segunda pasada.

[0025] **Ejemplo 1**

[0026] Un acero metaestable se preparó al fundir un calor con una química que tenía un Factor de Inestabilidad de 8.5 y M_{d30} (Nohara) = 447.6°F. El calor fue moldeado continuamente en losas. Las losas se re-calentaron a 2300°F y se enrollaron en caliente a un grosor de 0.175”, con una temperatura de embobinado de 1000°F. La banda caliente luego fue conservada para remover la escala. Las secciones de las bandas calientes conservadas fueron enrolladas en frío y enrolladas en caliente.

Para el propósito de enrollar en caliente, las secciones de banda caliente se calentaron a temperaturas deseadas en un horno y se enrollaron a calibres deseados.

[0027] La Figura 1 muestra la cantidad de transformación de martensita del enrollado frío y caliente de dicho acero metaestable. A la misma cantidad de reducción, la cantidad de martensita en cada acero enrollado en caliente fue significativamente menor que el acero enrollado en frío, el cual fue enrollado a temperatura ambiente. Los beneficios del enrollado en caliente se pueden ver a temperaturas bajas (150°F en este ejemplo) pero entre mayor sea la temperatura durante el enrollado en caliente (250°F en este ejemplo), menor será la cantidad de martensita formada.

[0028] La Figura 2 muestra el % de alargamiento del acero metaestable, después de enrollado en caliente y enrollado en frío a diferentes cantidades de reducción. Sorprendentemente, el enrollado en caliente llevó a un aumento en % de alargamiento hasta cierta cantidad de reducción antes de empezar a caer. Los

beneficios del enrollado en caliente se pueden adaptar bien sea variando la cantidad de reducción realizada a una temperatura o al variar la temperatura. Por otro lado, el enrollado en frío a temperatura ambiente siempre lleva a una disminución en el % de alargamiento para aceros metaestables.

5 [0029] **Ejemplo 2**

[0030] Se preparó otro acero metaestable al seleccionar una química con un Factor de Inestabilidad de 13.11 y M_{d30} (Nohada) = 227.6°F. El calor fue moldeado en lingotes. Después de recortar los lingotes, se obtuvieron cuatro barras de 5.75" (W) x 2.75" (T) x 2.75" (L). Estos lingotes recortados fueron empapados a 2200°F y se
10 enrollaron en caliente a 0.2" con una temperatura de terminado de 1100°F. La banda caliente luego fue conservada para remover la escala. Secciones de las bandas calientes conservadas luego se enrollaron en frío y se enrollaron en caliente a diferentes temperaturas. Para propósitos de enrollado en caliente, las secciones de banda caliente se calentaron a las temperaturas deseadas en un horno y se
15 enrollaron a calibres deseados.

[0031] En dicho acero metaestable, el enrollado en caliente seguido por enrollado en frío mostró un aumento tanto en resistencia como en % de alargamiento. Sin enrollado en caliente previo, el mismo acero mostró un incremento en resistencia pero una disminución en % de alargamiento, como se esperaba. La Figura 3(a)
20 muestra los datos de tensión de estrés verdadera del acero metaestable que fue enrollado en caliente al 30% y posteriormente enrollado en frío a temperatura ambiente a varias reducciones. En las Figuras 3(a) y 3(b), "WR" se refiere a enrollado en caliente y "RT" se refiere a enrollado en frío a temperatura ambiente. 30% de enrollado en caliente seguido por un 10% adicional de enrollado en frío
25 mostró un aumento tanto en alargamiento como en resistencia. El mismo material cuando se enrolló en frío por 30% seguido por un enrollado en frío adicional a temperatura ambiente de 0-30%, como se muestra en la Figura 3(b), mostró un incremento en la resistencia a la tracción ("UTS") pero una disminución en

alargamiento, como se esperaría. De nuevo, los beneficios del enrollado en caliente se pueden adaptar al variar la cantidad de reducción realizada a una temperatura o al variar la temperatura.

[0032] **Ejemplo 3**

- 5
- [0033] El acero metaestable del Ejemplo 1 anterior muestra el efecto del enrollado en caliente sobre el acero que contiene austenita metaestable como se muestra además por los datos de prueba definidos en las Tablas 1 y 2 a continuación, las cuales comparan las propiedades del acero que contiene austenita metaestable que ha sido recocida completamente (Bobina 1) con acero que contiene austenita metaestable que fue 25% enrollada en caliente en la planta (Bobina 2).
- 10

Tabla 1

Longitudinal								
	Límite Elástico a 0.2% desfase (MPa)		UTS (MPa)		Alarga. (Manual en 2") (%)		Dureza	
	Bobina 1	Bobina 2	Bobina 1	Bobina 2	Bobina 1	Bobina 2	Bobina 1 (HRB)	Bobina 2 (HRC)
Prom.	386.2	1197.6	1142.4	1551.8	52.6	21.8	98	46.6
Min.	376.1	1173.7	1126.7	1561.6	48.8	18.9		
Max.	394	1221.5	1164.8	1540.2	57.9	24		
Transversal								
	0.2% OYS (MPa)		UTS (MPa)		Alarga. (Manual en 2") (%)		Dureza	
	Bobina 1	Bobina 2	Bobina 1	Bobina 2	Bobina 1	Bobina 2	Bobina 1 (HRB)	Bobina 2 (HRC

Prom.	423.6	1111.9	1128.8	1520.8	54.5	19.6	98	47.3
Min.	394.6	1092.7	1104.5	1504.5	50.7	17		
Max.	435.7	1133.1	1149.3	1531.2	57.7	21.8		

Tabla 2

Prueba	Promedio (Bobina 1)	Promedio (Bobina 2)
Resistencia a Tracción	1188 MPa	1551.8 MPa
Límite Elástico a 0.2% Desfase	378 MPa	1197.6 MPa
Alargamiento	54.6%	21.8%
Alargamiento Uniforme	51.5%	20.4%
Relación de Deformación Plástica	0.80	0.86
LDH (Altura de Domo Limitante)	2.26"	1.32"
LDR (Relación de Retiro Limitante)	1.9	1.5
HER (Relación de Expansión de Agujero) (0.25mm/s, 8mm/s, 28mm/s, 114mm/s, 228mm/s)	5%, 10%, 21%, 39%, 45%	3.6%, 11.2%, 20.6%, 20.1%, 23.2%
Dureza	98 HRB	46.6 HRC

[0034] **Ejemplo 4**

- 5 [0035] El efecto del enrollado en caliente en anisotropía también fue estudiado en el acero metaestable del Ejemplo 1. La anisotropía puede tener un efecto

significativo en la formación posterior. El enrollado en caliente ayudó a manejar la anisotropía en propiedades mecánicas de aceros metaestables.

[0036] El efecto del enrollado en caliente en comparación con el enrollado en frío es además demostrado mediante los datos definidos en la Tabla 3 a continuación. La

5 banda caliente inicial fue la misma para ambos conjuntos de enrollado. Un conjunto fue enrollado en caliente (a ~250°F) a varias reducciones (10, 15 y 20%), el otro fue enrollado en frío a reducciones similares. En el caso de las muestras enrolladas en frío, las elongaciones en orientaciones longitudinal (L) y transversal (T) difirieron un poco. Entre mayor sea la cantidad de reducción, mayor es dicha diferencia. Sin

10 embargo, en el caso de enrollado en caliente, la diferencia es mucho menor.

Tabla 3

% Reducción	% Alargamiento					
	Enrollado en Frío			Enrollado en Caliente		
	L	T	% Diferencia	L	T	% Diferencia
10.0	21.1	15.0	40.7	22.1	16.4	34.8
15.0	18.8	10.1	86.1	19.7	12.6	56.3
20.0	18.1	7.6	138.2	19.8	13.6	45.6
% Reducción	UTS					
	Enrollado en Frío			Enrollado en Caliente		
	L	T	% Diferencia	L	T	% Diferencia
10.0	1114.0	1073.7	3.8	1065.4	1059.7	0.5
15.0	1226.6	1161.7	5.6	1199.3	1147.0	4.6
20.0	1321.2	1204.3	9.7	1226.2	1190.5	3.0
% Reducción	0.2% OYS					
	Enrollado en Frío			Enrollado en Caliente		
	L	T	% Diferencia	L	T	% Diferencia
10.0	577.8	600.2	-3.7	534.5	596.7	-10.4

15.0	724.9	688.8	5.2	664.3	674.1	-1.5
20.0	789.3	719.2	9.7	736.1	689.3	6.8